

APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE DEMOLICIÓN DE LA CIUDAD DE MADRID EN MORTEROS CON ZEOLITA NATURAL: UNA CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA DEL MEDIO AMBIENTE

Jorge Luis Costafreda Mustelier⁽¹⁾, Benjamín Calvo Pérez⁽²⁾, Xiomara Beatriz Peralta Orellana⁽³⁾.

(1) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid (UPM), Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid, E-mail: costafreda@yahoo.es, (2) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid (UPM), Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid, E-mail: benjamin.calvo.perez@gmail.com, (3) Universidad Politécnica de El Salvador, Boulevard Tutunichapa y 5ta Avenida Norte, E-mail: beatriz.peralta@gmail.com

RESUMEN

El ritmo de la construcción en la ciudad de Madrid alcanzó valores récord hasta los inicios del año 2008, que derivó en la demolición de cientos de edificaciones antiguas que generaron millones de toneladas de residuos sólidos, superando con creces la velocidad de su gestión, sumándose a esto la escasez de vertederos concertados, el encarecimiento del transporte y la contaminación creciente de suelos y lechos freáticos. El presente trabajo da a conocer las experiencias obtenidas de la caracterización sistemática de estos áridos reciclados y el conocimiento de su comportamiento en una mezcla de mortero donde es capaz de sustituir al árido natural en presencia de zeolita, la cual mejora sensiblemente las propiedades puzolánicas del RCD frente al cemento pórtland, obteniéndose resistencias mecánicas apreciables a 7 y 28 días entre 38,2 y 53,5 Mpa, respectivamente. La interpretación de los valores de resistencia obtenidos de los ensayos de probetas que contenían zeolita natural demuestra que la zeolita influye positivamente en el incremento de la reactividad hidráulica, la resistencia y las propiedades reológicas del mortero, superando estos parámetros en los casos en que la zeolita no fue introducida en el mortero. Los resultados obtenidos demuestran que el RCD puede tener otra gestión con los que se evitan dos tipos de impactos medioambientales: el provocado por la acumulación irresponsable de los desechos y el producido por la explotación indiscriminada de yacimientos de arenas fluviales y marinas.

ABSTRACT

The rate of the construction in the Madrid city reached record values up to the beginnings of the year 2008, which derived in the demolition of hundreds of ancient buildings that generated million tons of solid residues, overcoming the speed of management, in addition to this the dumps shortage, the transport as well as the increasing pollution of soils and underground water beds. This paper expose the experiences obtained of the systematic characterization and behavior of RCD in mortar, where is capable of replacing the natural sand in presence of zeolite, which improves sensitively the pozzolanic properties of the RCD mixed with portland cement, in which the mechanical resistances values from 7 to 28 days have been respectively between 38,2 and 53,5 Mpa. The interpretation of the resistance values obtained from essays of mortar with natural zeolite demonstrates the positive influences of this material in the hydraulic reactivity increase, the resistance and others properties of the mortar, overcoming these parameters in the cases where the zeolite was not introduced in the mortar. The results demonstrate that using RCD is possible to avoid two types of environmental impacts: the irresponsible accumulation of the tailing and the indiscriminate exploitation of fluvial and marine sands deposits.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad moderna demanda grandes volúmenes de recursos naturales, razón por la cual el hombre se impone la necesidad de buscar nuevas alternativas para proteger y preservar el medio ambiente. Uno de los mayores consumidores de recursos naturales, a nivel mundial, es el sector de la construcción, que utiliza grandes volúmenes de áridos en la

elaboración de morteros y hormigones. Asimismo, genera cantidades considerables de desechos urbanos procedentes de las demoliciones y restauraciones, por lo que su gestión, reciclado y aprovechamiento constituyen el principal reto a resolver por las empresas constructoras y las diputaciones, en la búsqueda de usos alternativos en este campo.

El presente trabajo aporta nuevas soluciones para viabilizar los volúmenes de residuos generados anualmente en la ciudad de Madrid, donde no es posible almacenar los escombros producidos por las constructoras. Al mismo tiempo, el árido natural, cuyo abastecimiento muchas veces eleva los costes de transporte por las distancias, al ser sustituido satisfactoriamente por el árido reciclado, ayudaría a mitigar el poderoso impacto que la industria minera provoca en los depósitos de arenas fluviales y marinas en su explotación indiscriminada.

El origen de este trabajo se enfoca en el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD), reorientando la vida útil de estos materiales mediante la fabricación de morteros con adiciones, mejorando sus cualidades con el empleo de zeolitas naturales, cuya explotación y uso obedecen a técnicas de extracción sencillas (Costafreda, J.L., B. Calvo, C.A. Magalhães, 2008).

El estudio de los comportamientos de morteros con zeolita española y árido natural (Costafreda, J.L., B., Calvo, 2007) (Costafreda, J.L., 2008) ha arrojado resultados favorables para la utilización de este mineral como componente activo del mortero.

En la elaboración de este trabajo se empleó el conjunto de normas españolas, cuyas especificaciones se ajustan a los propósitos de esta investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.

Mordenita:

En la realización de este trabajo se empleó mordenita del Collado de las Hermanicas, situado a 1,5 km, aproximadamente al norte del yacimiento San José-Los Escullos, en Cabo de Gata, Almería, cuya composición química, calculada por FRX, se ofrece en la tabla I (Costafreda, J.L., 2008).

Tabla I: Composición química de la zeolita por fluorescencia de rayos x.

Óxidos	Porcentaje presente	Elementos	Porcentaje presente
SiO₂	68,30	Si	31,81
Al₂O₃	11,95	Al	6,33
K₂O	1,38	Ca	0,820
CaO	1,15	Na	2,14
Na₂O	2,89	Mg	0,763
MgO	1,27	Fe	1,09
Fe₂O₃	1,56	Cl	0,082
CaO	1,15	Ti	0,0498
Cl	0,082	K	1,14

$$\text{Relación Si/Al} = \frac{Si}{Al} = \frac{31,89}{6,33} = 5,03$$

En la preparación definitiva de los morteros se introdujo una porción de zeolita, cuya fracción granulométrica estuvo en un rango inferior a las 63 micras.

Árido reciclado (RCD):

La granulometría inicial de los fragmentos de RCD era de 4 cm, aproximadamente; posteriormente, este diámetro se redujo a 0,5-1,0 cm, empleando para este fin la machacadora "Alas" tipo A112M. Para la obtención del tamaño de árido requerido (árido fino), se utilizó el molino vibratorio "Siebtechnik", con duración de molienda de 18 segundos, obteniéndose un diámetro de partícula entre 0,5-1 mm.

El coeficiente de friabilidad arrojó un valor de 22,7 % (norma UNE 83-115-89); los resultados se presentan en la tabla II.

Tabla II: Medida del coeficiente de friabilidad del árido reciclado.

Masa inicial m_1 (g)	546,00
Masa final m_2 (g)	414,30

El porcentaje de desgaste obtenido fue de 24,12 %, obtenido de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$F.A. = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 = 24,12 \%$$

De acuerdo a la norma UNE 83-115-89 la medida del coeficiente de friabilidad de las arenas no debe ser mayor al 40%. Por lo que el resultado obtenido permite el empleo del RCD en el mortero.

El análisis del contenido en materia orgánica mostró un color mucho más claro que el de la muestra de referencia. La norma española EN-1744-1:1998 puntualiza que al obtenerse una disolución, cuya suspensión es más clara que la mezcla patrón, los áridos se consideran exentos de materia orgánica; por tanto, el RCD empleado no aporta riesgos al mortero.

La densidad real de la muestra de RCD fue de 2,52 g/ cm³, según los cálculos efectuados con la relación siguiente:

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_a - M'_a} \times \rho_w$$

El coeficiente de absorción de agua de la muestra arrojó un valor de 3,9 %, según la siguiente fórmula:

$$Ab. = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

El valor del coeficiente de absorción de agua aporta datos acerca de la naturaleza del RCD, relacionados también con la eficacia del reciclado, las fracciones granulométricas dominantes y el porcentaje global de finos.

Para contrastar el efecto producido por esta absorción fue necesario incrementar la cantidad de agua en las mezclas para obtener una consistencia similar a la de los morteros fabricados a base de áridos naturales.

El análisis de la composición química del RCD (FRX) destaca la presencia de dióxido de silicio (SiO₂ = 54,4%) y óxido de calcio (CaO = 22,14%) como compuestos mayoritarios, así como tobermorita, yeso y calcita como fases minoritarias.

Arena normalizada (AN):

La porción inicial de arena empleada en este ensayo fue de 473,13 gramos. La masa retenida por cada uno de los tamices fue pesada y registrada, obteniéndose la mayor población de partículas en los tamices 0,125 y 1,25mm, respectivamente, conformando el 52.35% de la masa, característica propia de una arena normalizada. Las dos poblaciones subordinadas de partículas contaron con diámetros superiores a 1,25 mm, formando el 24% de la muestra, e inferiores a 0,125 mm, con un 4,84 % de la masa total (UNE-EN 196-1: 2005).

La granulometría de los áridos natural y reciclado fue comparada con el fin de determinar la posible similitud entre las curvas granulométricas de estos materiales.

Cemento de referencia:

El cemento de referencia, por su parte, exhibe los componentes químicos característicos que forman este tipo de conglomerante, según los datos de fluorescencia de rayos x; los resultados de la difracción de rayos x muestran diferentes reflexiones de picos típicos de las especies cristalinas anhidras que componen el clínker. Entre las especies que conforman dicho clínker se observa silicato bicálcico (belita), silicato tricálcico (alita), aluminato tetracálcico y yeso.

Tanto la mordenita como el cemento de referencia fueron sometidos al ensayo de los fillers (UNE-EN 933-10:2001), comprobándose que el 100% de las poblaciones granulométricas obtenidas no eran retenidas en el tamiz 0,063mm, siendo correcta la molienda de estos materiales.

FASES DE TRABAJO

Etapla I:

En esta fase se determinaron las proporciones adecuadas de RCD para su adición al mortero; se aumentó paulatinamente su dosis en la mezcla, manteniendo constante la cantidad de mordenita, cemento y agua normalizada. La muestra patrón (Cem_R_i), consistió en un mortero elaborado a base de árido natural, cemento y agua desmineralizada (UNE-EN 196-1: 2005).

Al conjunto de probetas de morteros elaborados con cemento, árido natural y árido reciclado (sin mordenita) se le denominó serie "A", donde se varió regularmente la proporción de arena normalizada (AN) y árido reciclado (RCD). El procedimiento empleado en estas dosificaciones se encuentra resumido en la tabla III.

Tabla III. Resumen de las dosificaciones de la etapa I serie "A".

Material	Áridos				Cemento		Agua desmineralizada	
	Arena Normalizada		Árido reciclado					
Muestra	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
Cem_R _i	100	1350	0	0	100	450	12,5	225
A-01	75	1012,5	25	337,5	100	450	12,5	225
A-02	50	675	50	675	100	450	12,5	225±50
A-03	25	337,5	75	1012,5	100	450	12,5	225±50
A-04	0	0	100	1350	100	450	12,5	225±50

Etapa II:

En esta etapa se elaboraron probetas combinando cemento, mordenita, AN, RCD y agua desmineralizada, agrupadas bajo el nombre común de serie “ZA”, manteniendo las dosificaciones de AN-RCD asumidas en la serie “A”.

En la preparación de las probetas de mortero se introdujo la relación cemento-mordenita (75%-25%), mientras que para el AN-RCD la proporción de sustitución varió regularmente entre 25%, 50%, 75% y 100% (ver tabla IV). La relación agua/cemento se mantuvo constante en el diseño de todas las muestras con un valor A/C=0,5, equivalente al 12,5% de agua sobre la masa total; sin embargo, en el momento de la preparación fue necesario agregar 50 gramos de agua adicionales en las muestras que presentaban mayor cantidad de RCD, con lo cual la relación agua/cemento osciló en el rango de 0,5 a 0,61 %.

Las cantidades de agregados presentes en los morteros de la serie “ZA” se presentan detalladamente en la tabla IV. Las edades de ensayo asumidas para ambas etapas fueron 7 y 28 días, respectivamente.

Tabla IV: Resumen de las dosificaciones de la etapa II serie “ZA”.

Material	Áridos				Conglomerantes				Agua desmineralizada	
	Arena Normalizada		Árido reciclado							
					Zeolita		Cemento			
Muestra	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
Cem_R _i	100	1350	0	0	0	0	100	450	12,5	225
ZA-01	100	1350	0	0	25	112,5	75	337,5	12,5	225
ZA-02	75	1012,5	25	337,5	25	112,5	75	337,5	12,5	225
ZA-03	50	675	50	675	25	112,5	75	337,5	12,5	225
ZA-04	25	337,5	75	1012,5	25	112,5	75	337,5	12,5	225
ZA-05	0	0	100	1350	25	112,5	75	337,5	12,5	225

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Resistencias mecánicas de la etapa I serie “A”:

La resistencia a compresión de las probetas analizadas aumenta en la medida en que disminuye la proporción de RCD en el mortero (ver figura 1), sin embargo, todos los valores de resistencia se enmarcan dentro del límite exigido por la norma UNE-EN 196-1: 2005 (Rc 20,0 MPa a los 7 días).

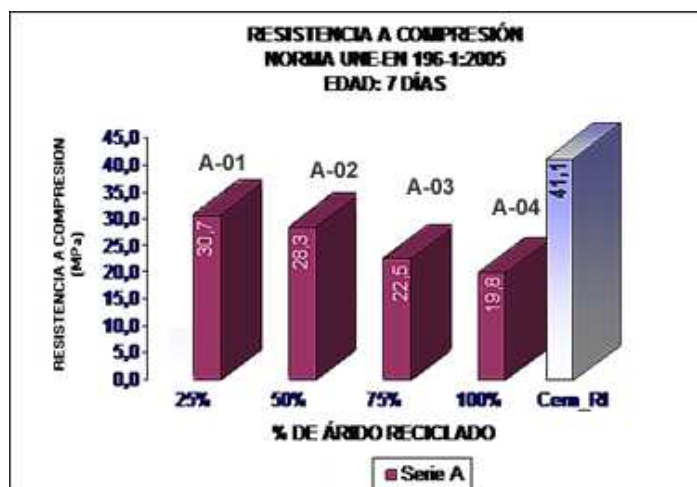


Figura 1: Resistencias mecánicas a compresión para la etapa I serie “A” a 7 días.

A los 28 días, la resistencia a compresión sigue experimentando incrementos visibles (muestra A-01= 40,8 Mpa; A-02= 37,7 Mpa; A-03= 33,1 Mpa; A-04= 30,4 Mpa); no obstante, estos resultados son insatisfactorios, por cuanto no alcanzan el valor mínimo exigido por la norma ($R_c \geq 42,5 - 62,5$ Mpa). Es evidente que la presencia del RCD en la mezcla del mortero impide la manifestación activa de las reacciones hidráulicas; aun cuando su presencia se reduce a un 25% este material no es capaz de aportar valores de resistencia mecánica normal lo suficientemente altos como para igualar o superar los límites normalizados (ver figura 2).

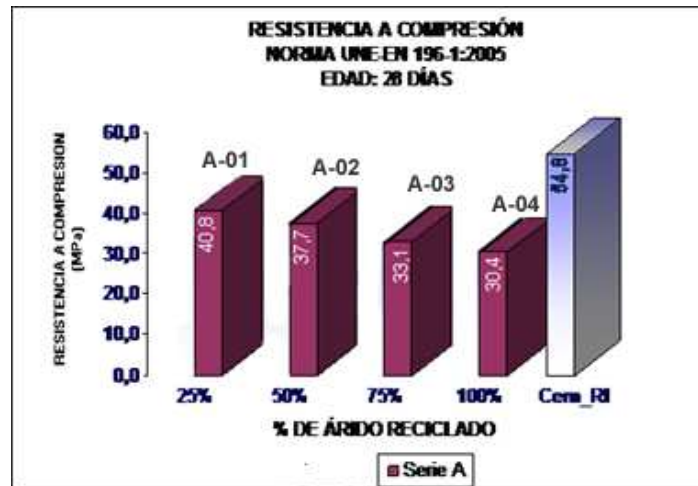


Figura 2. Resistencias mecánicas compresión de la etapa I serie “A” a 28 días.

Resistencias mecánicas de la etapa II serie “ZA”:

Los resultados de las resistencias mecánicas obtenidos del estudio de las probetas elaboradas con mezclas que incluyen el 25% de mordenita, ofrecen un panorama bien distinto al estudiado en la serie “A”. Al examinar el gráfico de la figura 3, se observa que los valores de resistencia mecánica inicial aportados por todas las probetas superan los 20,0 Mpa establecidos por la norma para los 7 días; incluso, se debe destacar que la muestra ZA-01 posee un valor de resistencia muy cercano al de la muestra de referencia (Cem_RI).

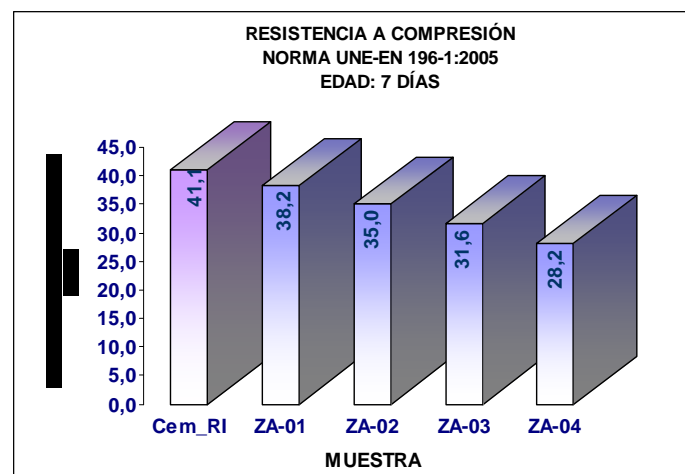


Figura 3: Resistencia a compresión de las muestras (probetas) de morteros de la etapa II-serie “ZA” a 7 días de edad.

La muestra ZA-01, que contiene 25% de mordenita y 25% de árido reciclado (ver tabla IV), presenta la mayor resistencia a compresión. Las muestras ZA-02, ZA-03 y ZA-04 han experimentado valores menores que ZA-01, que indica niveles de reactividad menores en la medida que se sustituye el AN por el RCD en la mezcla del mortero; sin embargo, este aspecto no influye negativamente en las resistencias exigidas por la norma.

En la muestra ZA-04 se ha sustituido el AN por RCD al 100%, como consecuencia, se ha obtenido la menor resistencia a compresión de todas las analizadas, pero debe destacarse que sobrepasa en 8,2 MPa el valor mínimo característico esperado para un mortero fabricado con este tipo de cemento.

A los 28 días todas la probetas analizadas arrojan valores de resistencia normal comprendidos en el rango 45,6 Mpa (muestra ZA-04) y 53,5 Mpa (muestra ZA-01); comparando estos resultados con los especificados en la norma UNE-EN 196-1: 2005 para esta edad, se llega a la conclusión que se encuentran dentro del intervalo normalizado ($\geq 42,5 - 62,5$ Mpa). La muestra ZA-01 se ubica a tan sólo 1,3 Mpa por debajo de la muestra de referencia (ver figura 4).

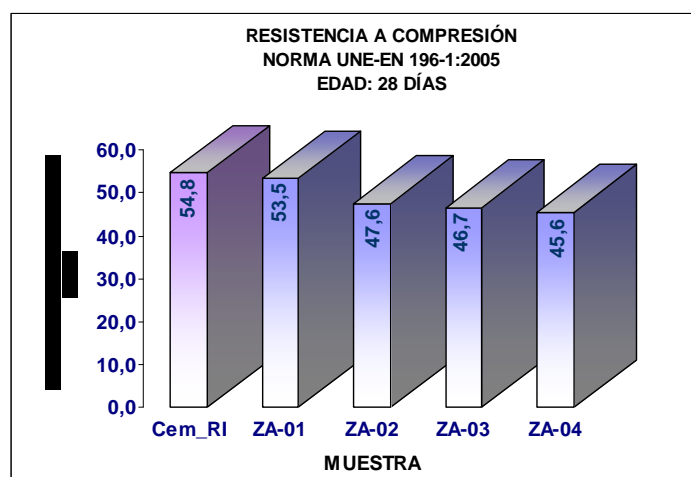


Figura 4: Resistencia a compresión de las muestras (probetas) de morteros de la etapa I serie “ZA”, a los 28 días de edad.

La resistencia aportada por las demás muestras (ZA-02, ZA-03 y ZA-04) aumenta sensiblemente, esto indica que las variaciones en las dosificaciones cemento-mordenita (75-25%) y AN-RCD (25%, 50%, 75% y 100%) son igualmente efectivas y prácticas.

La comparación de los resultados obtenidos en ambas series permite establecer la evolución de las resistencias mecánicas (iniciales y normales) a través del tiempo, así como sus relaciones con las diferentes proporciones de agregados en la mezcla (ver figura 5).

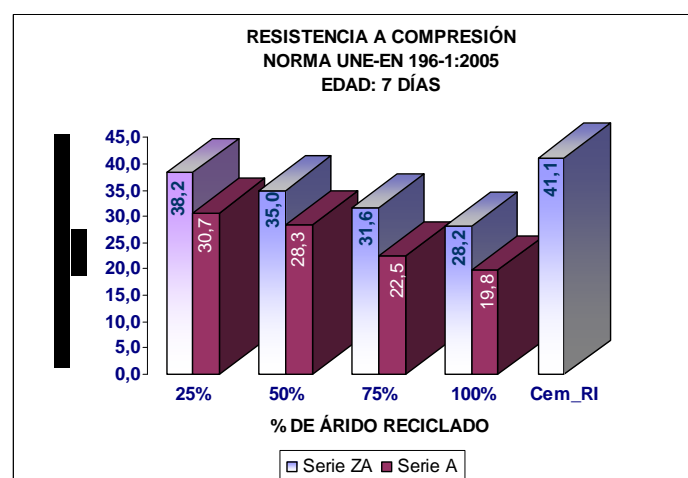


Figura 5: Gráfica comparativa de la resistencia a compresión de los morteros de las etapas I y II, series “A” y “ZA”, a la edad de 7 días.

En la figura 5 se comparan las poblaciones de resultados específicos para cada serie analizada, destacándose diferencias notables entre las muestras que contienen mordenita respecto a las que

carecen de este mineral. Los mayores valores corresponden a las muestras que contienen sólo el 25% de RCD para ambas series.

La figura 6 establece el gran margen de variación producido entre los valores de resistencia mecánica normal de las dos series estudiadas, siendo evidente la profunda influencia ejercida por la mordenita en la reacción hidráulica que se produce en la pasta.

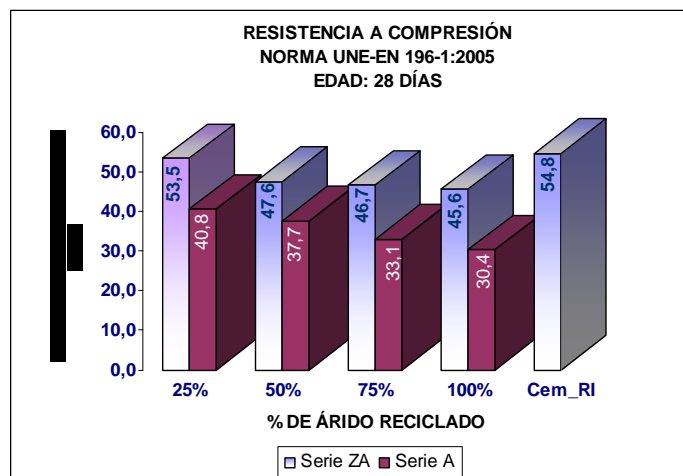


Figura 6: Comparación de la resistencia a compresión de los morteros de las etapas I y II, series “A” y “ZA”, a la edad de 28 días.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que puede gestionarse el RCD mediante su uso en morteros, donde sustituye satisfactoriamente a las arenas naturales en presencia de zeolita, con lo cual pueden obtenerse resistencias considerables.

De acuerdo con los resultados obtenidos, podrían condicionarse los sitios de almacenamiento temporal de RCD con mordenita (lechos de zeolita), la cual es capaz de captar y retener los iones de sustancias peligrosas, entre los que se pueden citar Hg, Cd, Zn, Pb, Ni, Li y algunos fenoles. De este modo, se produce un prebeneficio de los residuos sólidos que los hacen aptos para su reciclaje y uso ulterior.

El empleo de zeolita en la fabricación de morteros, utilizando la proporción 75-25%, infiere un ahorro importante de cemento pórtland, facilitando, asimismo, la menor emisión de CO₂ a la atmósfera. De igual modo, la utilización de RCD contribuye a la preservación de los yacimientos de arenas naturales, evitándose de este modo el poderoso impacto producido por la explotación.

La zeolita puede aportar a los cementos pórtland con adiciones y púzolánicos cantidades apreciables de SiO₂ y Al₂O₃, lo que evitaría igualmente la extracción incontrolada de las arcillas y del yeso.

BIBLIOGRAFÍA

Calvo, B., J.L., Costafreda, 2008. *Proyecto para la recuperación ambiental de algunas zonas de Almería con el empleo de la zeolita del yacimiento San José-Los Escullos, Cabo de Gata. E.T.S.I. de Minas Madrid, Fundación Cajamar, Almería (España).* 18 p.

Calvo, B., J.L. Parra, M. Sanabria, 2007. *Morteros de albañilería fabricados con áridos reciclados. Revista Actualidad Minera. 1er. Trimestre. Nº 37. (España).* pp. 4-6.

Costafreda, J.L., 2008. Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). Tesis Doctoral. E.T.S.I. Minas. Madrid (España). 515 p.

Costafreda, J.L., B. Calvo, C. Magalhães, 2008. Eficiencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la elaboración de morteros con árido reciclado (RCD). Primer Congreso Argentino de Áridos. Mar del Plata, (Argentina). 12p.

Costafreda, J.L., B. Calvo, 2007. Calidad de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata como agregados activos en cementos puzolánicos resistentes a los sulfatos y al agua de mar. V Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. (Panamá). 13 p.

UNE 83-115-89. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas.

UNE EN 13139:2002. Áridos para morteros.

UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

UNE-EN 933-1:1998. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

UNE-EN 933-10:2001. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 10: Evaluación de los finos. Granulometría de los fillers (tamizado en corriente de aire).

UNE-EN 1916:2003. Absorción de agua.